

**Скворцов Антон Алексеевич**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ  
ДЕФЕКТОВ ВЕДУЩИХ МОСТОВ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ ДЛЯ  
БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ АГРЕГАТОВ  
ТРАНСМИССИИ**

Специальность 05.05.03 – «Колесные и гусеничные машины»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Ижевск – 2015

Работа выполнена на кафедре «Автомобили и металлообрабатывающее оборудование» ФГБОУ ВПО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова»

Научный руководитель: **Филькин Николай Михайлович**,  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Автомобили и  
металлообрабатывающее оборудование»  
ФГБОУ ВПО «Ижевский государственный  
технический университет имени  
М.Т. Калашникова», г. Ижевск

Официальные оппоненты: **Фасхиев Хакимзян Амирович**,  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Прикладная  
гидромеханика» ФГБОУ ВПО «Уфимский  
авиационный технический университет»,  
г. Уфа

**Карабцев Владимир Сергеевич**,  
кандидат технических наук, заместитель  
главного конструктора ОАО "КАМАЗ" по  
научной работе и инновациям,  
г. Набережные Челны

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Нижегородский  
государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева»

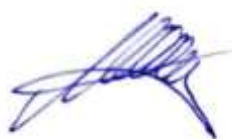
Защита состоится «25» декабря 2015 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.081.31 при ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» по адресу: 423810, Татарстан, г. Набережные Челны, пр. Мира, 13А, Набережночелнинский институт (филиал) ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», УЛК-5, ауд.309.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Набережночелнинского института (филиала) ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 423810, Татарстан, г. Набережные Челны, пр. Мира, 68/19, диссертационный совет Д 212.081.31.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.081.31



кандидат технических наук, доцент  
Мавлеев Ильдус Рифович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена разработке методики и алгоритмов виброакустической оценки дефектов ведущих мостов колесных машин. Суть работы в исследовании применимости существующих методов виброакустической диагностики к оценке технического состояния ведущих мостов колесных машин, а также в разработке методики таковой оценки с возможностью её последующей реализации в качестве бортовой системы диагностирования ведущих мостов колесных машин.

**Актуальность работы.** Ведущий мост автомобиля является важным агрегатом при передаче крутящего момента от двигателя к колесам. Агрегаты трансмиссии должны функционировать во всех режимах эксплуатации автомобиля. Потеря работоспособности ведущего моста приводит к потере работоспособности автомобиля в целом. В связи с этим, к техническому состоянию данного агрегата необходимо предъявлять повышенные требования, а также необходимо вести систематический мониторинг, дающий четкое представление о текущем техническом состоянии ведущего моста и возможность прогнозирования наступления отказа данного агрегата трансмиссии. Оценка технического состояния на основании виброакустических характеристик представляется предпочтительной, т.к. относится к неразрушающим методам и позволяет сократить затраты времени и труда на ее реализацию. В основу предлагаемой методики положена очевидная зависимость: изменения, появляющиеся в процессе функционирования в подвижных сопрягающихся узлах ведущих мостов, приводят к изменению их виброакустической нагруженности. Установив с определенной степенью достоверности связь между изменениями технических параметров и виброакустическими характеристиками агрегата, можно осуществлять его диагностику, предупреждать отказы, а также разрабатывать конструктивные мероприятия по его совершенствованию.

Главной проблемой, ограничивающей массовое применение методов виброакустического диагностирования, является достоверность результатов диагностирования – «диагнозов». Сформулировать признаки достоверности в обобщенной форме при данном виде диагностирования не представляется возможным, потому как уровень неопределенности реакции вибросигнала на эксплуатационные дефекты довольно высок. Современный уровень развития элементной базы позволяет снизить уровень неопределенности виброотклика до приемлемого.

Специфические условия работы исследуемых агрегатов потребуют уточнения целого ряда подходов и методов проектирования, испытаний и доводки, особенно в области обеспечения оптимальной информативности виброакустических сигналов.

В работе принята концепция составления индивидуальных словарей значений виброакустических диагностических признаков со всех классов состояний объекта исследования. Так, согласно концепции, сначала по определенной методике составляются словари эталонного (исправного) состояния агрегата, с которым дальше сравниваются текущие значения признаков фиксируемых по аналогичной методике. Посредством этого происходит постановка диагноза о соответствии тому или иному техническому состоянию.

Появившиеся в последние годы средства аппаратного обеспечения виброакустического диагностирования, обработки результатов этого процесса создают основу для реализации предложенной оценки.

Таким образом, существующая потребность адекватной методики диагностирования ведущих мостов колесных машин, реализованной в рамках бортовой системы диагностирования, и видимая возможность решения проблемы для отдельного механизма составляют в сумме объективные основы актуальности темы диссертационного исследования.

**Цель работы:** повышение эксплуатационных характеристик колесных машин путем применения виброакустического диагностирования агрегатов трансмиссии (на примере ведущих мостов).

**Задачи исследования:**

1. Проанализировать основные методы анализа виброакустического сигнала, применительно к использованию их в системе виброакустического диагностирования.
2. Разработать технические средства виброакустической диагностики ведущего моста легкового заднеприводного автомобиля.
3. Оценить степень информативности основных характеристик виброакустического сигнала для виброакустического диагностирования.
4. Разработать методику виброакустической оценки дефектов ведущих мостов колесных машин, которая могла бы лечь в основу бортовой системы диагностирования агрегатов трансмиссии.
5. Доказать адекватность разработанных теоретических положений работе реального ведущего моста легкового автомобиля.
6. Провести комплекс экспериментальных исследований по созданию основ виброакустической оценки дефектов ведущих мостов легковых заднеприводных автомобилей.

**Научная новизна работы:**

1. Обоснована возможность применения виброакустической оценки при диагностики агрегатов трансмиссии транспортных средств и определены информативные виброакустические признаки проявления и развития дефектов в типовых узлах и элементах ведущих мостов.
2. Впервые разработано аппаратное обеспечение для виброакустического диагностирования ведущего моста заднеприводного легкового автомобиля.
3. Разработана методика виброакустической оценки дефектов ведущих мостов колесных машин, пригодная для использования в бортовой системе диагностирования агрегатов трансмиссии и позволяющая определять техническое состояние ведущих мостов и прогнозировать момент наступления отказов.
4. Структурно-следственная диагностическая модель, описывающая функциональную зависимость параметров, характеризующих техническое состояние объекта исследования и диагностических параметров, извлекаемых из виброакустического сигнала ведущего моста во время его анализа.
5. Разработаны научно-обоснованные технические решения по созданию системы диагностирования ведущих мостов колесных машин, реализованной в рамках бортовой системы диагностирования.

**Практическая ценность работы:**

1. Разработанная методика позволит повысить надежность ведущих мостов и обеспечить их безаварийное использование.

2. Результаты работы создают основу для реализации бортовой системы диагностирования ведущих мостов колесных машин на основе использования виброакустического сигнала этих агрегатов.

3. Предлагаемые средства виброакустического диагностирования позволят уменьшить трудоемкость процесса диагностирования, а, следовательно, снизить затраты на диагностику и ремонтные работы.

**Объект исследования.** Задние ведущие мосты легковых автомобилей.

**Предмет исследования.** Методика и технические средства виброакустического диагностирования ведущих мостов заднеприводного легкового автомобиля.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Методика оценки технического состояния ведущего моста по его виброакустическим параметрам.

2. Технические средства виброакустической диагностики ведущего моста легкового заднеприводного автомобиля.

3. Результаты экспериментальных исследований по проверке адекватности разработанной методики, определению основных диагностических параметров виброакустического сигнала и степени их информативности;

4. Структурно-следственная диагностическая модель виброакустической оценки дефектов ведущих мостов заднеприводных легковых автомобилей.

**Апробация работы.** Основные положения и выводы диссертационного исследования докладывались и обсуждались на:

Международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию Победы советского народа в Великой Отечественной войне "Инновации в транспортном комплексе. Безопасность движения. Охрана окружающей среды" (г. Пермь, 2010 г.); Научно-практической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых – «Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке» (г. Ижевск, 2011 г.); Международной научно-технической конференции, посвященной 85-летию транспортного образования в Зауралье и 55-летию Уральского государственного университета путей сообщения "Актуальные проблемы современной науки" (г. Курган, 2011 г.); Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием – «Современные научные исследования в дорожном и строительном производстве» (г. Пермь, 2011 г.); IX Всероссийской научно-технической конференции – «Проблемы и достижения автотранспортного комплекса» (г. Екатеринбург, 2011 г); Международной научно-практической конференции, посвященной Дню науки и 20-летию Уральского межрегионального Отделения Российской Академии транспорта (г. Курган, 2012 г.).

**Личный вклад соискателя.** Все главы диссертации написаны автором работы. Автору также принадлежат исследовательская часть и обработка результатов экспериментов, разработка методики виброакустического диагностирования, диагностической модели объекта исследования.

**Публикации.** По теме работы опубликованы 10 научно-технических статей, в том числе 3 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, а так же 7 статей в материалах Международных, Всероссийских и Республиканских конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, результатов и выводов, изложена на 153 странице текста, содержит 39 рисунков, 19 таблиц, список использованных источников, включающий 103 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая ценность работы.

**В первой главе** описано современное состояние виброакустического диагностирования механических агрегатов. Изложены основные методы детектирования дефектов силовых механических агрегатов, такие как: спектральный метод, метод ударных импульсов, резонансный метод, метод формирования n-мерного вектора параметров технического состояния агрегата и др. Для выявления дефектных узлов, а также оценки текущего технического состояния ведущих мостов легковых автомобилей по средством виброакустического диагностирования может использоваться сочетание спектрального, резонансного методов и метода ударных импульсов.

Ведущие отечественные ученые, внесшие большой вклад в развитие виброакустического диагностирования механических агрегатов, как части технического диагностирования: А.В. Александров, И.И. Артоболевский, Ф.Я. Балицким, Н.А. Баркова, В.В. Беляков, С.М. Виноградов, И.В. Гаранин, М.Д. Генкин, Л.А. Глебовым, И.А. Долгов, М.А. Ивановой, В.И. Костенко, В.Г. Кульчихин, М.К. Леонтьев, К.Я. Лелиовский, С.В. Леньков, В.Д. Мигаль, А.Т. Осяев, О.Ю. Потапова, В.А. Смирнов, А.Г. Соколовой, В.М. Шабает, А.Е. Яблоков и др.

Созданию методической и элементной базы виброакустического диагностирования механических систем и агрегатов посвящены работы зарубежных ученых, таких как: Д. Байес, С.Браун, Н.И. Бурау, Р. Коллакот, М. Мозер, А. Робертсон, Ю.В. Сопилка, З. Энджел.

По итогам изучения наработок в сфере виброакустического диагностирования можно сделать вывод о наличии мощной элементной базы для виброакустического диагностирования всех видов механических систем и хорошо разработанного аппарата математического моделирования и исследования виброакустических процессов в системах такого рода. Несмотря на это, ведущий мост автомобиля, как объект виброакустического диагностирования, изучен мало, однако существующий базис виброакустической диагностики позволяет разработать методику определения технического состояния агрегата с использованием информации о вибропроцессах.

Отечественная и зарубежная промышленность предлагают большой выбор универсальных аппаратных средств виброакустического диагностирования. Среди наиболее известных отечественных производителей: НТЦ «Приз» г. Москва, ООО «Диамех» г. Москва, ИТЦ «Оргтехдиагностика», ООО «Инкотес» г. Нижний Новгород, ПФФ «Вибро-Центр» г. Пермь, так же представлено и широко используется оборудование зарубежных компаний: «Bruel&Kjaer» (Дания), «Endevco» (США), «SKF» (Швеция), «RFT» (Германия).

Разрабатываемое оборудование, рассмотренных фирм, представляет собой сложный программно-вычислительный комплекс, построенный на платформе микропроцессора. Использование этого решения позволило реализовать в приборах широкий спектр функциональных возможностей (измерительных и вычислительных), позволяющих анализировать различные вариации вибросигналов, а также рассчитывать

дополнительные параметры вибрации: среднеквадратичное значение (СКЗ), среднеквадратичное отклонение (СКО), пик-фактор и т.д.

Виброакустическая диагностика как часть технической диагностики обладает существенным недостатком - повышенной помеховосприимчивостью. Данный недостаток устраняется применением современного математического аппарата и рациональным расположением точек диагностирования.

Анализ проведенных ранее работ позволил сформулировать и обосновать задачи исследования, позволяющие достичь поставленной цели диссертационной работы.

**Во второй главе** рассмотрены конструктивные особенности объекта исследования на примере автомобиля ИЖ-2126 (рисунок 1) и основные неисправности ведущих мостов заднеприводных автомобилей.

Задний мост содержит неразрезную балку, состоящую из картера главной передачи, в который запрессованы и дополнительно закреплены сваркой два трубчатых кожуха полуосей. Главная передача — гипоидная. Ведомая шестерня главной передачи крепится к фланцу коробки дифференциала специальными болтами с пружинными шайбами. Коробка дифференциала вращается в двух конических подшипниках. Полуосевые шестерни установлены в цилиндрических гнездах коробки дифференциала и опираются на нее через опорные шайбы. Сателлиты установлены на оси и находятся в постоянном зацеплении с полуосевыми шестернями. Полуоси — разной длины (левая — более длинная).



Для решения задачи формализации и автоматизации процесса виброакустического диагностирования была разработана структурно-следственная диагностическая модель объекта диагностирования (рисунок 2). С помощью данной модели можно имитировать основные процессы, происходящие в механизме при его эксплуатации, имеющие большое значение при постановки диагноза. Модель включает в себя три функциональных уровня (начиная с верхнего): 1) уровень эксплуатационных дефектов; 2) уровень проявления этих неисправностей в виброакустическом сигнале; 3) уровень информативных диагностических параметров.

Смысл разработанной диагностической модели можно представить в виде:

$$\sum_{i=1}^m Z_i = L \sum_{j=1}^n U_j .$$

где  $\sum_{i=1}^m Z_i$  - множество структурных параметров механизма, соответствует первому уровню модели;  $\sum_{j=1}^n U_j$  - множество информативных диагностических признаков, тождественно третьему уровню модели;  $L$  - связь между этими двумя группами параметров устанавливается множителем (функцией), который соответствует второму уровню диагностической модели.

**Рисунок 1. Конструкция заднего моста автомобиля ИЖ-2126**

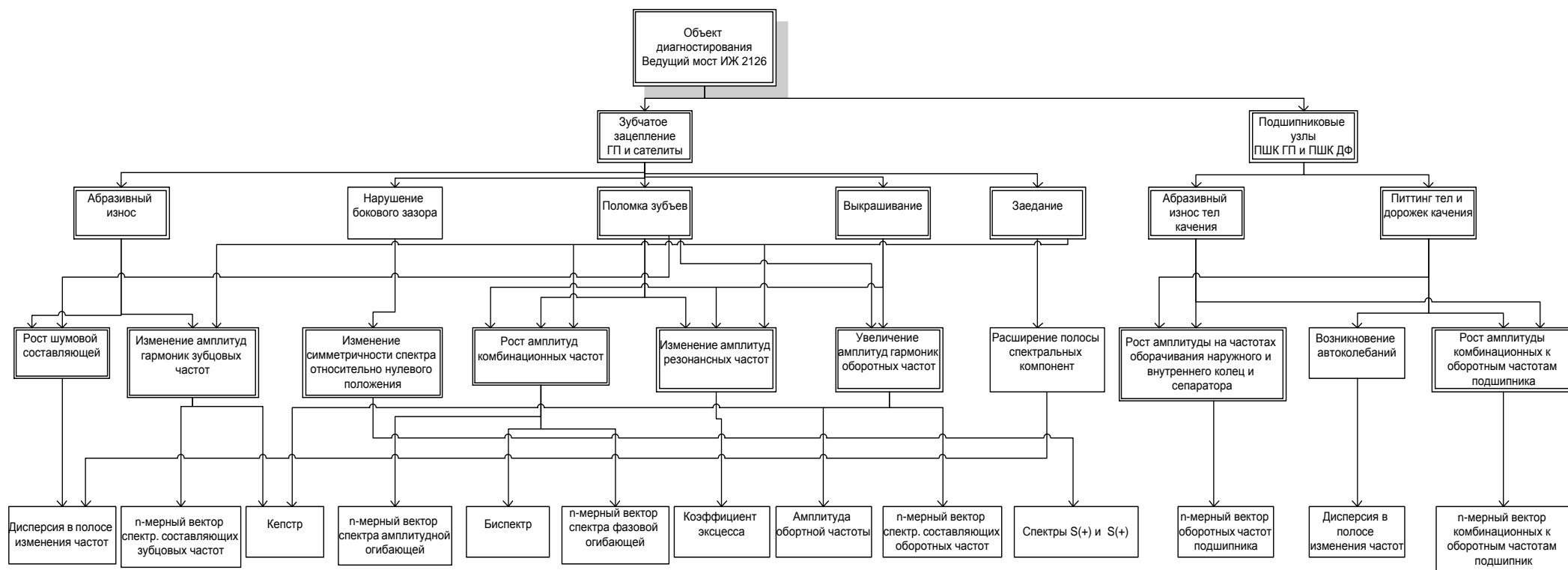


Рисунок 2. Структурно-следственная диагностическая модель ведущего моста ИЖ-2126.



Во второй главе был предложен разработанный алгоритм диагностирования объекта исследования в рамках бортовой системы виброакустического диагностирования технического состояния ведущих мостов автомобиля (БСВАД).

БСВАД - диагностическая система, обеспечивающая мониторинг технического состояния ведущего моста, посредством использования информации, содержащейся в виброакустическом сигнале агрегата, вмонтированная в штатную (бортовую) систему диагностирования и выполняющая свои функции в режиме повседневной эксплуатации. БСВАД имеет следующие структурные части: ЭБУ, индикатор неисправностей, анализирующая аппаратура и соединительные провода.

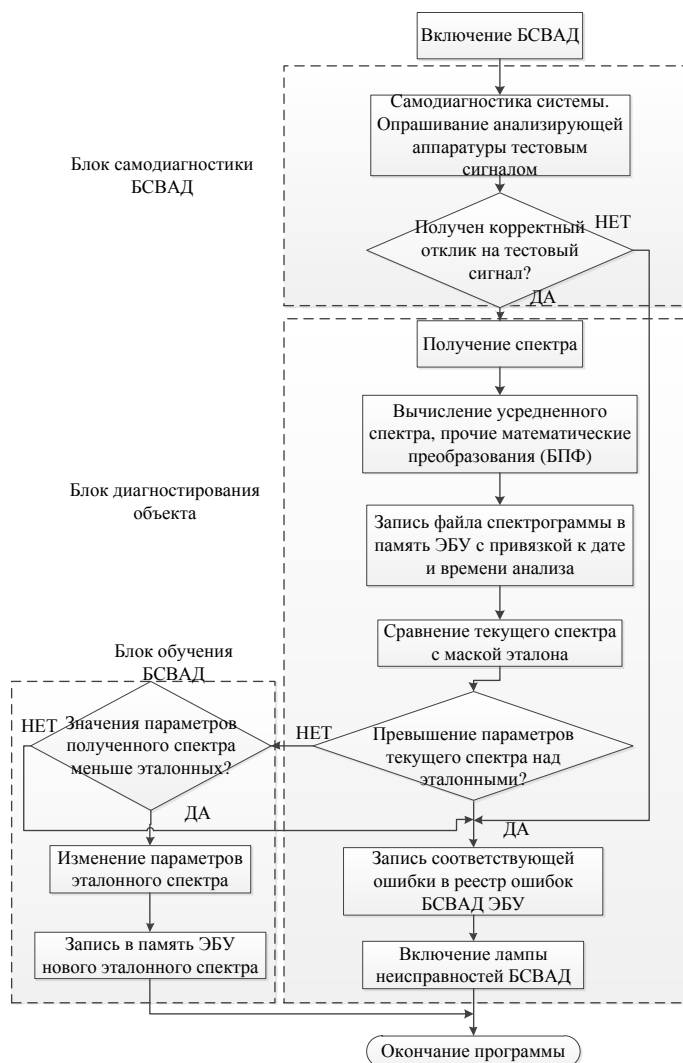
Алгоритм работы бортовой системы виброакустического диагностирования представлен на рисунке 3. Указанная программа состоит из трех основных модулей:

- Модуль самодиагностики – модуль в течение, которого ЭБУ посылается тестовый сигнал на анализирующую аппаратуру. Работоспособность системы определяется по полученному обратному сигналу;

- Модуль диагностирования – собственно, основной модуль, в течение которого и происходит процесс виброакустического диагностирования;

- Модуль обучения системы – в течение, которого происходит формирование базы эталонов, относительно которых в последующем происходит постановка диагноза диагностируемому объекту.

Превышение пороговых значений фиксируется при сравнении спектров и заносится в реестр ошибок, сведения с указанием уровня превышения (в децибелах и процентах от эталона) на соответствующих частотах (Гц), в последующем на основании записанных данных производится локализация дефекта. Исходя из свойств диагностической модели (рисунок 2) устанавливается текущее техническое состояние диагностируемого объекта.



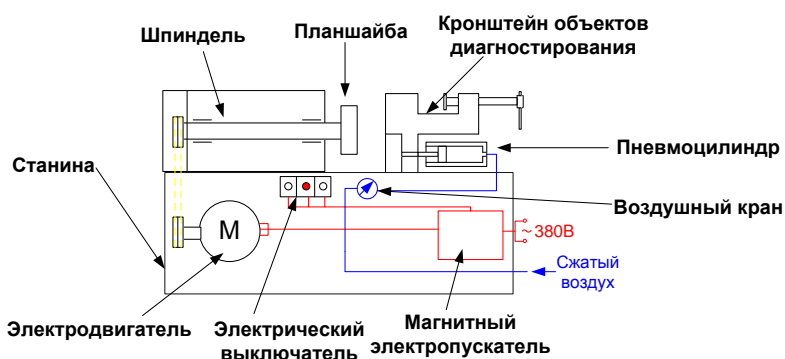
**Рисунок 3. Алгоритм работы бортовой системы виброакустического диагностирования (БСВАД).**

**В третьей главе** рассмотрен разработанный стенд виброакустического диагностирования (рисунок 4). Стенд для виброакустической диагностики дефектов ведущих мостов легковых автомобилей состоит из трех основных частей: приводной, измерительной и нагружающей. Рассмотрим подробнее каждую из составных частей.



**Рисунок 4. Стенд для виброакустического диагностирования ведущих мостов легковых автомобилей**

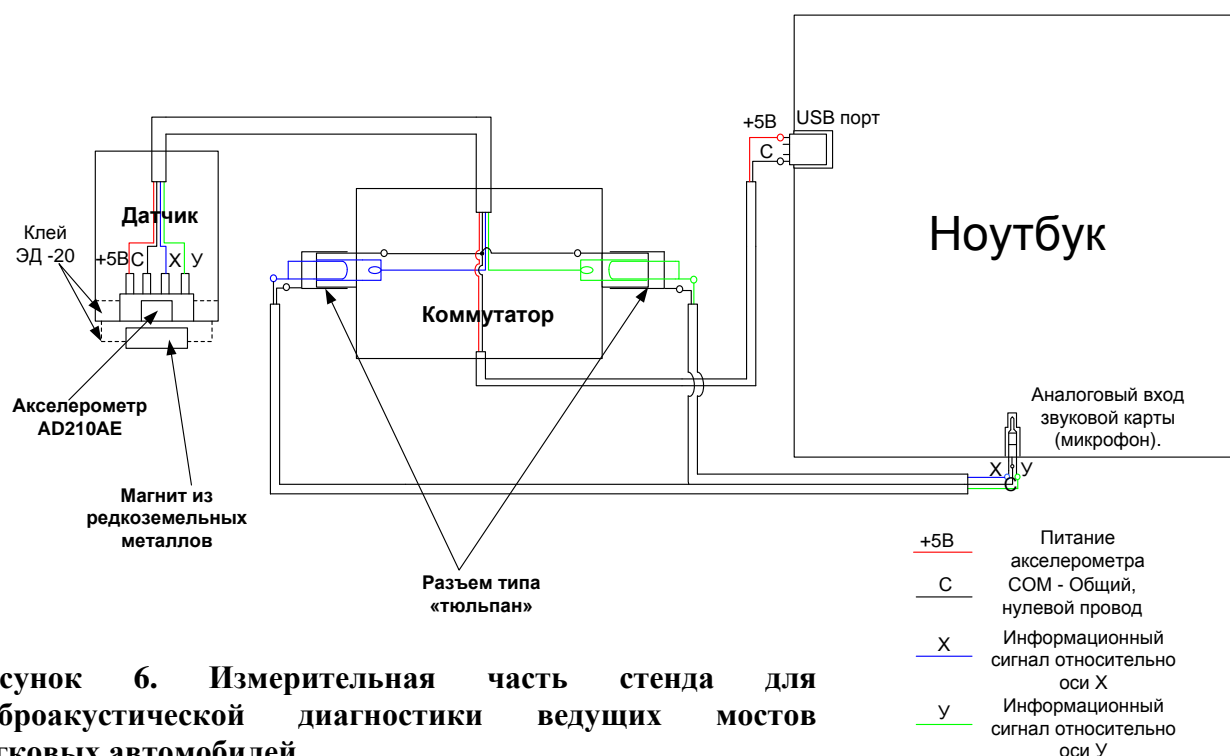
Приводная часть – это часть, приводящая в движение объект исследования (ведущий мост легковых автомобилей). Основные составные элементы представлены на рисунке 5: электродвигатель, ременная передача, шпиндель, станина, электрический блок, пневмосистема, устройство для закрепления объектов исследования. Измерительная часть (рисунок 6) – эта часть, с помощью которой измеряют значения виброакустических характеристик объектов диагностирования.



**Рисунок 5. Приводная часть стенда виброакустической диагностики ведущих мостов легковых автомобилей**

Измерительная часть (рисунок 6) – эта часть, с помощью которой измеряют значения виброакустических характеристик объектов диагностирования.

Измерительная часть состоит из: измерительного датчика –



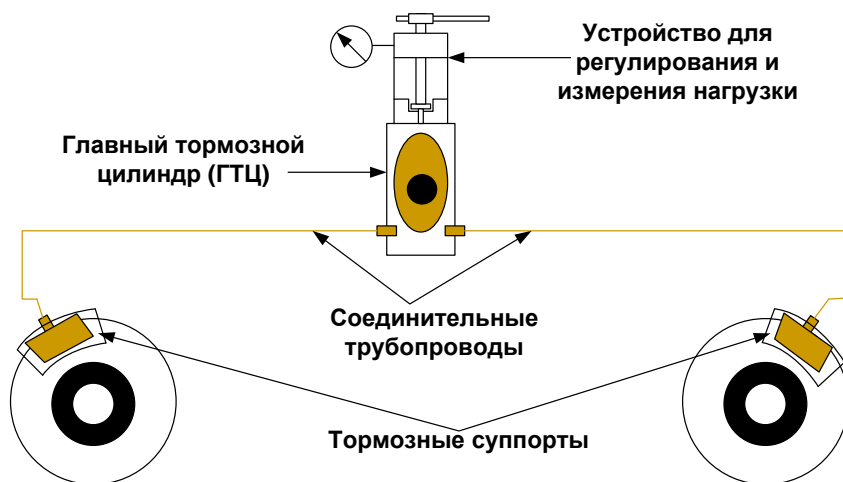
**Рисунок 6. Измерительная часть стенда для виброакустической диагностики ведущих мостов легковых автомобилей.**

акселерометра вмонтированного в корпус, коммутатора, соединительных проводов и ноутбука со звуковой картой

Нагрузочная часть стенда представляет собой штатные дисковые тормозные механизмы, используемые в автомобиле.

Нагрузочная часть (рисунок 7) состоит из: рабочих тормозных элементов – суппортов, главного тормозного цилиндра (ГТЦ),

устройства, позволяющего тарировать тормозные усилия (в нашем случае нагрузку) и соединительных магистралей.



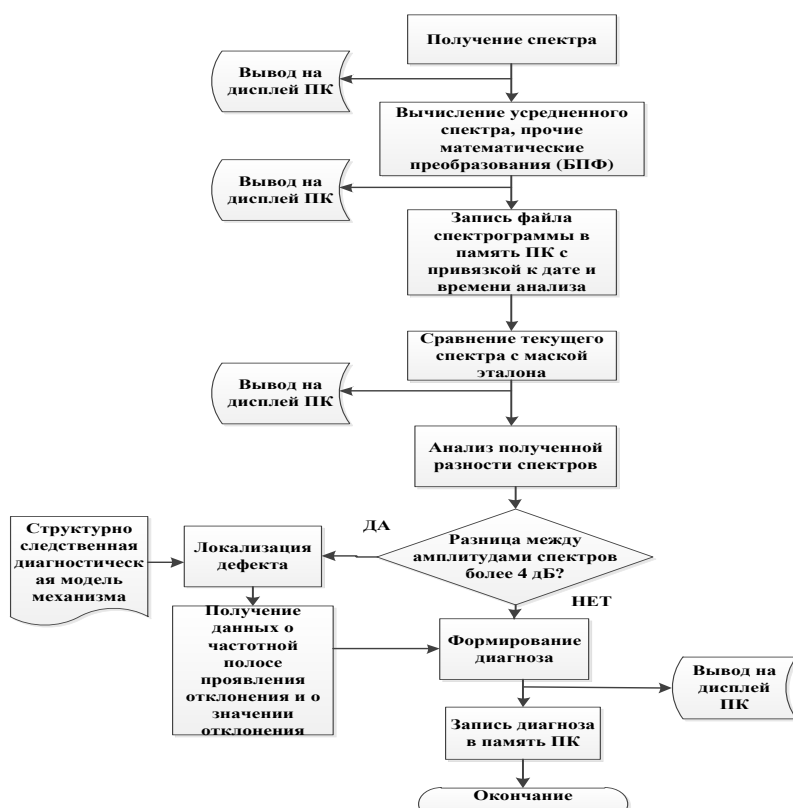
**Рисунок 7. Нагружающая часть стенда для виброакустической диагностики ведущих мостов легковых автомобилей.**

Также в главе описаны технические возможности программного комплекса «Power Grath», применявшегося в работе для получения и анализа виброакустического сигнала, а также выделения из него информативных составляющих. Представлен его функционал и составные модули.

**В четвертой главе** описана разработанная методика проведения экспериментальных исследований, оптимальных с точки зрения получения наиболее информативных параметров, представлен алгоритм и методика обработки результатов диагностирования.

На основании проведенных в предыдущих главах исследований, был разработан алгоритм проведения виброакустического диагностирования ведущего моста ИЖ-2126 на разработанном в рамках исследования виброакустическом стенде (рисунок 8).

На этапе получения спектра, согласно алгоритма, происходит получение



**Рисунок 8. Укрупненный алгоритм проведения виброакустического диагностирования ведущего моста ИЖ-2126 на виброакустическом стенде.**

виброакустического сигнала по средством акселерометра, установленного на объекте диагностирования, соединительных кабелей и АЦП. Далее оцифрованный и усиленный сигнал поступает в ПК, где происходит его предварительный просмотр (органилептически), анализ на наличие резких отклонений, что может свидетельствовать об ошибках получения сигнала. Далее с помощью специального ПО сигнал модифицируется (БПФ) в удобную для сравнения форму (частотное представление сигнала). Результаты этих процессов выводятся на экран, ПК с последующей их записью в долговременную память компьютера с привязкой к дате и номеру эксперимента.

Процесс определения технического состояния основан на сравнении текущего спектра с эталонным, хранящимся в памяти системы. При превышении отклонения амплитуды текущего спектра более чем на 4 дБ, начинается процесс локализации дефекта.

Процесс идентификации дефекта основывается на зависимости между структурными параметрами агрегата и информативными параметрами виброакустического сигнала, раскрытой для объекта исследования в его диагностической модели (рисунок 2). Диагноз выдается в текстовом виде: «ИСПРАВЕН» или «НЕИСПРАВЕН». Диагноз записывается в память ПК с привязкой ко времени, дате и номеру эксперимента / объекта диагностирования.

В главе также представлена разработка регрессионной математической модели диагностирования на виброакустическом стенде при условии получения наиболее информативных спектральных характеристик виброакустического сигнала.

В рамках данного пункта исследования была решена оптимизационная задача по определению условий проведения виброакустического диагностирования ведущих мостов.

Задача оптимизации, сводилась к получение максимально информативного виброакустического сигнала, информативность сигнала будем оценивать следующим параметром (параметром оптимизации):  $y_1$  - дисперсия  $\sigma_x^2$  является количественной оценкой мощности переменных составляющих сигнала вибрации.

Факторы, определяющие процесс:  $x_1$  – частота вращения хвостовика ведущего моста автомобиля, об/мин;  $x_2$  – нагрузка, прикладываемая к тормозным механизмам моста, Н\*м;  $x_3$  – место установки анализирующей аппаратуры (акселерометра) на корпусе ведущего моста;  $x_4$  – температура масла в картере редуктора моста, °С. Было принято решение изменять в опытах первые два фактора. Место установки анализирующей аппаратуры решено определить, руководствуясь априорной информацией, расположение акселерометра решено не менять на протяжении всех опытов эксперимента. Значение температуры масла в картере моста решено поддерживать в диапазоне:  $50 \pm 5$  °С.

Таким образом, цель эксперимента сводилась к нахождению таких условиях проведения, при которых дисперсия огибающей виброакустического сигнала имела бы максимальное значение.

Результаты экспериментальных исследований представлены в таблице 1.

Таблица 1

Матрица планирования и результаты эксперимента.

Номер опыта	Случайный порядок реализации опытов	$x_1$		$x_2$		$y, \sigma_x^2$	
		код	Н*м	код	об/мин	Повторные опыты	Среднее значение
1	3	-	60	-	1500	$3,54 \cdot 10^{-8}$	$5,37 \cdot 10^{-8}$
	4	-	60	-	1500	$1,84 \cdot 10^{-8}$	
	8	-	60	-	1500	$9,55 \cdot 10^{-8}$	
	10	-	60	-	1500	$6,55 \cdot 10^{-8}$	
2	1	+	100	-	1500	$3,59 \cdot 10^{-7}$	$2,44 \cdot 10^{-7}$
	6	+	100	-	1500	$3,38 \cdot 10^{-7}$	
	14	+	100	-	1500	$1,21 \cdot 10^{-7}$	
	16	+	100	-	1500	$1,58 \cdot 10^{-7}$	
3	2	-	60	+	2500	$2,18 \cdot 10^{-7}$	$2,7 \cdot 10^{-7}$
	11	-	60	+	2500	$2,71 \cdot 10^{-7}$	
	12	-	60	+	2500	$3,19 \cdot 10^{-7}$	
	15	-	60	+	2500	$3,01 \cdot 10^{-7}$	
4	5	+	100	+	2500	$7,03 \cdot 10^{-8}$	$1,58 \cdot 10^{-7}$
	7	+	100	+	2500	$3,19 \cdot 10^{-8}$	
	9	+	100	+	2500	$3,09 \cdot 10^{-8}$	
	13	+	100	+	2500	$2,22 \cdot 10^{-7}$	

После проведения регрессионного анализа, было получено следующее уравнение регрессии:

$$y = -1,4 \cdot 10^{-6} + 1,78 \cdot 10^{-8} x_1 + 7,47 \cdot 10^{-10} x_2 - 8,33 \cdot 10^{-12} x_1 x_2.$$

Данная модель прошла проверки адекватности и значимости коэффициентов регрессии.

По итогам решения оптимизационной задачи было принято решение о том, что оптимальными, с точки зрения информативности вибросигнала, являются условия проведения виброакустического диагностирования, соответствующие следующим значениям факторов:

$$x_1 = 60 \text{ Н*м}, x_2 = 2500 \text{ об/мин.}$$

В главе также описана методика получения и обработки результатов экспериментальных исследований, представлено описание программных средств, используемых при этом.

Для сбора, обработки, выделения информативных компонент и запоминания данных о виброакустических сигналах в



Рисунок 9. Аппарат по преобразованию графиков спектров.

исследовании применялось специализированное программное обеспечение Power Graph 2.1

В используемом программном продукте также представлен аналитический аппарат по работе с графиками (рисунок 9). Обозначенный аппарат состоит из трех блоков: получение спектра БПФ, получение одномерного и двумерного законов распределения вероятности.

В исследовании использовался аппарат быстрого преобразования Фурье (рисунок 9). Представленный механизм позволяет получать данные о распределении амплитуд виброакустического сигнала по частотным полосам. Получаемые данные позволяют идентифицировать дефекты, используя разработанную диагностическую модель, получать

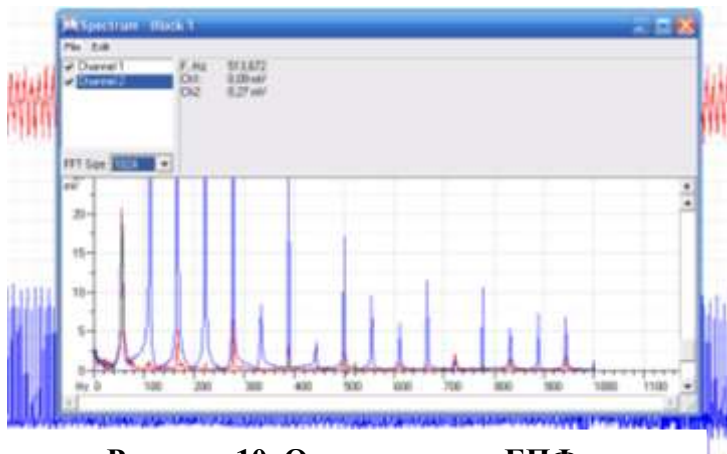


Рисунок 10. Окно утилиты БПФ.

информацию о локализации дефекта

и степени его развития. Также утилита позволяет проводить синхронный анализ двух спектров.

Встроенная в программный комплекс функция построения графика одномерного распределения плотности вероятности (рисунок 11) позволяет оценивать отклонение характеристик виброакустического сигнала от эталонных.

При всех графических преобразованиях виброакустического сигнала есть возможность выбора оптимального масштаба (единичного отрезка оси) представления информации, что облегчает анализ данных и процедуру постановки диагноза в целом.

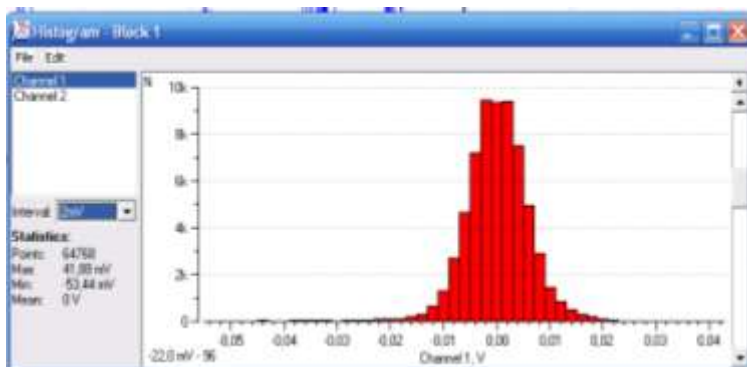


Рисунок 11. Окно построения столбчатой гистограммы одномерного распределения плотности вероятности.

В рамках экспериментальных исследований диссертационной работы использовался описанный выше механизм определения информационных виброакустических параметров – амплитуда виброакустического сигнала и частота её проявления в виброакустическом сигнале (в спектре после БПФ). Для экспресс-оценки технического состояния также исследовался одномерный закон плотности распределения вероятности. Также на разных этапах исследования использовался аппарат статистического анализа характеристик спектра (СКЗ, Дисперсия, Экстремумы, Медиана и прочие).

**В пятой главе** приводятся результаты экспериментальных исследований, подтверждающих разработанную в диссертации методику виброакустического диагностирования ведущего моста, предложены мероприятия по обеспечению соблюдения чистоты эксперимента.

Для создания условий, обеспечивающих получение единой диагностической информации, принимались во внимание следующие факторы: Постоянная частота вращения и значение тормозного момента (согласно проведенным ранее исследованиям); одинаковое количество и качество смазочного масла; место точек установки датчиков и обоснованность выбора точек установки.

Разработанное в рамках диссертации оборудование в рамках данного пункта было испытано на соответствие его метрологических характеристик требуемым для виброакустического диагностирования.

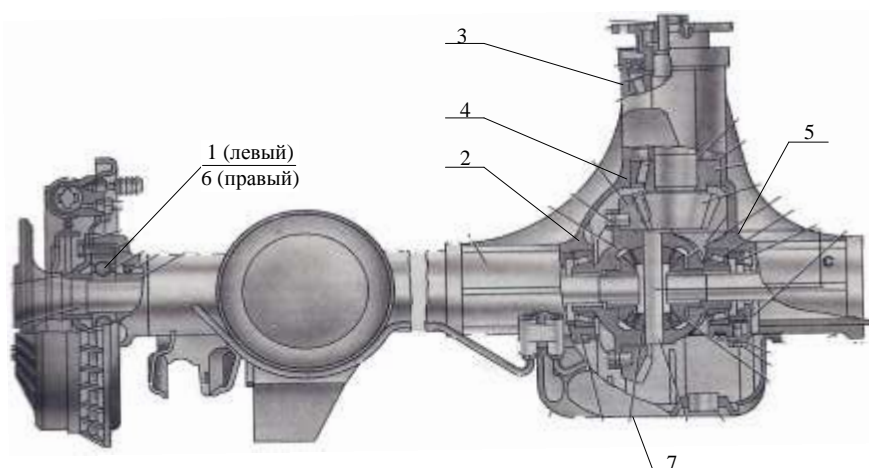
С целью определения относительной погрешности измерения системы ( $\Delta = ((A_1 - A_2) / A_1) * 100\%$ , где  $A_1$  – амплитуда исходного сигнала,  $A_2$  – амплитуда получаемого сигнала) был проведен ряд экспериментальных исследований. На всех из числа стандартных частот 1-3 октавного преобразования формировался стабильный сигнал с заранее известными характеристиками. Амплитуда сигнала изменялась от 0 до 120 дБ, с шагом изменения в 5 дБ.

На полученных результатов был сделан вывод о том, что погрешность системы ВАД является переменной от частоты величиной. Наблюдается тенденция постепенного уменьшения значения погрешности с увеличением частоты, однако имеются пиковые значения ошибок: 400 Гц (2,44%), 1600 (1,68 %) и 3150 (1,73%).

Согласно требованиям, предъявляемым к виброизмерительной аппаратуре максимально допустимая погрешность измерения составляет 2,5 %, то разработанная СВАД удовлетворяет установленным требованиям и может применяться для виброакустического диагностирования.

Основными критериями при выборе диагностических точек являлись следующие: минимальная удаленность точки контроля от исследуемого узла агрегата; привязка диагностических точек к точкам связи узлов агрегата с корпусом моста (подшипниковые опоры).

Конструкция заднего моста (рисунок 12) включает в себя ведущую вал-шестерню, смонтированную на двух роликовых конических подшипниках (б.т.к.), дифференциальный механизм с ведомой шестерней ГП, расположенный на двух подшипниках 6У-7510 (6 т.к.) и полуосей, одним концом входящие в



**Рисунок 12. Диагностические точки определения технического состояния ведущего моста автомобиля ИЖ-2126. 1,6 – точки контроля полуосевых подшипников; 2,5 – диагностические точки подшипников дифференциального механизма; 3,4 – точки контроля состояния подшипников ведущей вал-шестерни; 7- точка экспресс диагностирования технического состояния ГП.**



сателлит, а другим установленные в подшипник 6-160308АУШ (8 т.к.). На основании вышеперечисленных критериев были определены 7 диагностических точек (рисунок 12).

Точки 1-6 – удовлетворяют предъявляемым требованиям к максимальной близости к объектам контроля и расположены на подшипниковых узлах. В точках 2-5 наряду с дефектами подшипниковых узлов можно выявить дефекты ГП и дифференциального механизма. Точка 7 не может в полной мере использоваться в качестве диагностической, поскольку она не имеет прямого контакта с дифференциальным механизмом и до нее не доходят колебания от зубчатой передачи через корпус металла и слой масла. Однако точка 7 применима, в связи с легкостью доступности к ней в условиях автомобиля, к проведению экспресс диагностирования, для принятия решения о более глубоком диагностировании с использованием точек 1-6.

Для подтверждения выдвинутых предложений был проведен ряд экспериментальных исследований, в рамках которых изучалось значение виброускорения, полученное в разных точках контроля. Было выдвинуто предположение о том, что увеличение виброускорения при перемещении датчика указывает на уменьшение потерь при передаче виброакустического сигнала от объекта контроля датчику.

Для определения оптимальных точек расположения датчика определили 7 областей на поверхности исследуемого агрегата размером 8 см на 8 см, центрами в определенных областях явились выбранные ранее диагностические точки (рисунок 11). Намеченные области разбили на участки 2 на 2 см (всего 16 участков). Во всех участках измерялось максимальное значение виброускорения. В исследовании принимали участие, как исправные мосты, так и мосты с имитированными дефектами. Дефекты мостов моделировались с помощью установки заведомо неисправных деталей. Частота вращения составила 2500 об/мин. В рамках эксперимента проводились исследования на холостом ходу, так и с тормозным моментом 60 Н\*м.

Проведенный анализ виброакустических сигналов, полученных при измерении в ранее определенных диагностических точках и в скорректированных показал, что максимальное отклонение значений не превышает  $0,1 \text{ мм/с}^2$  и при измерении в штатных точках происходит потеря некоторых составляющих виброакустического сигнала, особенно в области низких частот.

При проведении экспериментальных исследований, подтверждающих разработанную методику значение частоты вращения хвостовика моста и величину тормозного момента, приложенного к полуосям моста, принимали исходя из результатов экспериментальных исследований, изложенных в главе 4 работы. Другими словами частота вращения ( $\omega_{об}$ ) принималась 2500 об/мин, а тормозной момент ( $M_{тр}$ ) – 60 Нм.

На параметры виброакустического сигнала также большое влияние оказывают параметры смазочных масел, используемых в диагностируемых мостах. Основное влияние оказывают температура, количество, вязкость и качество масла.

При проведении диагностических работ принято решение обеспечить нормальный (согласно рекомендациям завода изготовителя) уровень смазочного масла; температуру масла на всем протяжении исследований поддерживать в диапазоне  $50 \pm 5^\circ\text{C}$ ; также необходимо обеспечить надлежащее качество смазочного масла.



Для подтверждения предложенной методики на первоначальном этапе экспериментальных исследований был проведен ряд экспериментов по изучению виброакустических характеристик исправного ведущего моста. Целью работ стало определение соответствия теоретически рассчитанных параметров виброакустического сигнала и экспериментально полученных. Также в рамках исследований решалась задача получения эталонных значений некоторых параметров вибросигнала объекта исследования.

В эксперименте участвовали 10 исправных мостов. Исследования проводились на частоте 2500 об/мин и с подводимым тормозным моментом 60 Нм.

Обобщенные результаты экспериментальных исследований представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Результаты сравнения расчётных параметров и экспериментальных.

Точки контроля	Расчетные частоты, Гц				Экспериментальные частоты, Гц			
	$\omega_H$	$\omega_B$	$\omega_C$	$\omega_{TK}$	$\omega_H$	$\omega_B$	$\omega_C$	$\omega_{TK}$
1	30	56	4,68	41,2	29,3	56,4	5	41,4
2	19,3	45	3,6	30	20	44,3	4,3	29,3
3	116,55	216,5	18,2	163,9	115,7	217,1	18,56	164,2
4	75	165,2	20,5	1213	73,5	163,8	20,7	1213,8
5	19,3	45	3,6	30	20	44,3	4,3	29,3
6	30	56	4,68	41,2	29,3	56,4	5	41,4

Результаты исследования подтверждают соответствие расчетных и экспериментальных исследований. Максимальное отклонение параметров не превышает 1 Гц.

В рамках экспериментальной части работы также был проведен ряд исследований, посвященных оценке пригодности предложенной методики для оценки дефектов, вызванных нарушением пятна контакта в зубчатом зацеплении главной передачи моста. В исследованиях моделировались дефекты установки главной передачи моста. В рамках серии экспериментов изучалась зависимость амплитуды виброакустического сигнала от величины тормозящего момента, подведенного к полуосям моста.

Полученные результаты экспериментов свидетельствуют о то, что амплитуда колебаний значительно зависит от величины подведенной нагрузки. В режиме холостого хода влияние исследуемых дефектов зубчатой передачи проявляются в виброакустическом сигнале очень плохо. При увеличении нагрузки наблюдается амплитуды виброакустического сигнала. Правда при достижении величины тормозного момента 3000-3200 Н\*м тенденция к росту замедляется, и при максимальной нагрузке составляет всего 0,18 дБ, что меньше погрешности виброизмерительного комплекса.

Поэтому измерение влияния тормозного момента на величину амплитуды вибросигнала целесообразно проводить при нагрузке 3000 Н\*м.

Основным экспериментальным исследованием в работе было – проверка адекватности предложенной методики и оценка погрешности измерения средств, получения информации и анализа виброакустического сигнала.

В исследованиях были задействованы 35 задних мостов автомобиля Иж-2126 новых и с пробегом в 2 тыс.км. Измерения виброакустических характеристик производились в и ранее определенных и оптимизированных диагностических точках моста. В экспериментах использовались мосты с симитированными дефектами различных узлов.

Результаты исследований приведены в таблице 3. Здесь: деф. – обнаружен дефект, испр. – нет дефекта.

Таблица 3.

Результаты комплексной оценки технического состояния ведущего моста методом виброакустической диагностики.

№ опыта, моста	Новый мост			Мост с пробегом		
	Нач. точки	Оптим. точки	Факт. состояние	Нач. точки	Оптим. Точки	Факт. состояние
1	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.
2	Испр.	Испр.	Испр.	Деф.	Деф.	Деф.
3	Деф.	Деф.	Деф.	Испр.	Деф.	Испр.
4	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.
5	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.
6	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.
8	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.
9	Деф.	Испр.	Испр.	Деф.	Деф.	Деф.
10	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.
11	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.
12	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Испр.
13	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.
14	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.
15	Испр.	Испр.	Испр.	Деф.	Деф.	Деф.

16	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.
17	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.
18	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.
19	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.
20	Деф.	Деф.	Испр.	Деф.	Деф.	Деф.
21	Испр.	Деф.	Деф.	Деф.	Испр.	Испр.
22	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.
23	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.
24	Испр.	Испр.	Испр.	Деф.	Деф.	Деф.
25	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.
26	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.
27	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.
28	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.
29	Испр.	Испр.	Испр.	Деф.	Деф.	Деф.
30	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.
31	Деф.	Деф.	Деф.	Испр.	Испр.	Испр.
32	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.
33	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.
34	Деф.	Испр.	Испр.	Деф.	Деф.	Деф.
35	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.	Деф.

По итогам проведенных экспериментальных исследований можно сделать о том, что при контроле технического состояния ведущего моста в первоначальных точках был пропущен один дефект и выявлено не существующих 5, а в оптимизированных точках пропущенных дефектов не было, но были выявлены несуществующих 3.

Соответствие экспериментально полученных результатов фактическому состоянию мостов является подтверждением достоверности проведенных исследований и адекватности разработанной, в рамках данной диссертационной работы, методики определений технического состояния ведущих мостов автомобиля ИЖ-2126 по средством виброакустического диагностирования.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Наиболее значимые научные и практические результаты диссертационной работы сосредоточены в следующем:

1. Впервые разработана и практически реализована конструкция стенда для виброакустической диагностики ведущих мостов легковых автомобилей, включающая приводную, измерительную и нагружающую части, определены диагностические точки и информативные показатели виброакустического сигнала.

2. Разработан алгоритм диагностирования технического состояния ведущего моста автомобиля с помощью виброакустического стенда, позволяющий определять техническое состояние объекта диагностирования без его разборки, автоматизировать процесс диагностирования и прогнозировать момент наступления отказа агрегата.

3. Разработан алгоритм работы бортовой системы виброакустического диагностирования технического состояния ведущего моста, включающий в себя функции самодиагностирования системы и обучения.

4. Разработана методика формирования индивидуального виброакустического «словаря» силовых механических агрегатов. Виброакустический словарь представляет собой спектр, полученный после быстрого преобразования Фурье. Такой паспорт может быть сформирован для любого механического агрегата, в любом его техническом состоянии (исключая неработоспособное).

5. Разработана структурно-следственная диагностическая модель ведущего моста автомобиля.

6. Математическая модель, которая описывает влияние внешних условий проведения виброакустической диагностики ведущих мостов легковых автомобилей ( $x_1$  – нагрузка на полуосях моста и  $x_2$  – частота вращения фланца ведущей вал-шестерни главной передачи моста) на значение виброакустических характеристик диагностируемого агрегата, имеет вид:

$$y = -1,41 \cdot 10^{-6} + 1,78 \cdot 10^{-8} x_1 + 7,47 \cdot 10^{-10} x_2 - 8,33 \cdot 10^{-12} x_1 x_2.$$

7. Оптимальные условия проведения виброакустического диагностирования:  $x_1 = 2500$  об/мин,  $x_2 = 60$  Н\*м, температура смазочного масла на уровне  $50 \pm 5$  °С, уровень и качество масла – согласно рекомендациям завода-изготовителя.

8. Получены информативные диагностические показатели, оценивающие нарушение регулировки бокового зазора в главной передаче и степень износа зубьев зубчатых колес:  $S_+$  и  $S_-$  (положительные и отрицательные значения спектральных амплитуд соответственно).

9. Доказана адекватность разработанной методики виброакустической оценки технического состояния ведущих мостов легковых автомобилей, расхождения между теоретическими и экспериментально полученными параметрами не превышают погрешности виброизмерительного комплекса (2,5 %).

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации научных результатов кандидатских диссертаций:

1. **Скворцов, А.А.** Разработка стенда для виброакустической диагностики дефектов ведущих мостов легковых автомобилей/ Скворцов А.А., Филькин Н.М.// Интеллектуальные системы в производстве: Периодический научно-практический журнал Ижевского государственного технического университета. - Вып. 1 (17). - Ижевск: ИжГТУ, 2011. - С. 145-150

2. **Скворцов, А.А.** Система виброакустического диагностирования ведущих мостов легко-вых автомобилей/ Скворцов А.А., Филькин Н.М.// Автомобильная промышленность: Ежемесячный научно-технический журнал. - Вып. 1. - М.: Машиностроение, 2013. - С. 30-32.

3. **Скворцов, А.А.** Аппаратное обеспечение системы виброакустического диагностирования ведущих мостов легковых автомобилей// Техничко-технологические проблемы сервиса: Научно-технический журнал Санкт-Петербургского государственного университета сервиса и экономики. - Вып. 1 (23) 2013. - СПб.: СПбГУ-ЭС, 2013. - С. 6-11.

Публикации в прочих изданиях:

1. **Скворцов, А.А.** Оборудование для виброакустической диагностики дефектов ведущих мостов легковых автомобилей / Скворцов А.А., Филькин Н.М.// Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 85-летию транспортного образования в Зауралье и 55-летию Уральского государственного университета путей сообщения "Актуальные проблемы современной науки". - Курган: Издательство КИЖТ, 2011. - С. 137-140.

2. **Скворцов, А.А.** Разработка структуры стенда для виброакустической диагностики дефектов ведущих мостов легковых автомобилей / Скворцов А.А., Филькин Н.М.// Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию Победы советского народа в Великой Отечественной войне "Инновации в транспортном комплексе. Безопасность движения. Охрана окружающей среды". - Том 1. - Пермь: Издательство ПГТУ, 2010. - С. 212-214.

3. **Скворцов, А.А.** Оборудование для виброакустической диагностики ведущих мостов легковых автомобилей// Сборник материалов IX Всероссийской научно-технической конференции – «Проблемы и достижения автотранспортного комплекса». – Екатеринбург: Издательство УрФУ, 2011. - С. 179-182.

4. **Скворцов, А.А.** Разработка методики виброакустической оценки дефектов ведущих мостов легковых автомобилей / Скворцов А.А., Филькин Н.М.// Материалы научно-практической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых – «Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке». – Ижевск: Издательство ИжГТУ, 2011. - С.101-104.

5. **Скворцов, А.А.** Виброакустический стенд диагностики ведущих мостов легковых автомобилей. Материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием – «Современные научные исследования в дорожном и строительном производстве». – Пермь: Издательство ПГТУ, 2011. - С. 196-203.

6. **Скворцов, А.А.** Разработка структуры стенда для виброакустической диагностики ведущих мостов легковых автомобилей// Сборник инновационных проектов

выставки сессии ИжГТУ: Второй Республиканский Инновационный форум (электронная версия, Copyright Учебный центр Edgestile). - Ижевск: ИжГТУ, 2010.

7. **Скворцов А.А.,** Филькин Н.М. Методические основы разработки регрессионной математической модели виброакустической характеристики ведущего моста легкового автомобиля// Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной Дню науки и 20-летию Уральского межрегионального Отделения Российской Академии транспорта. - Курган: Издательство КГУ, 2012. - С. 121-123.